



Escuela
Politécnica
Superior

Estudio de la Dinámica de la Deforestación Tropical de Gabón mediante Datos del Satélite Sentinel-1



Grado en Ingeniería en Sonido e Imagen
en Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Autor:

María Rastoll Giménez

Tutor/es:

Josep David Ballester Berman

Julio 2021

*A mis abuelos, porque
me dieron ánimos para
empezar este camino y
fuerzas para terminarlo.*

Agradecimientos

Agradecer, en primer lugar, a mi tutor, Josep David, por su paciencia y su ayuda incondicional, por enseñarme esta otra vía de trabajo que no conocía y sobre todo por ser un profesor de los que dejan huella. También agradecer a todos y cada uno de los profesores con los que me he cruzado en mi etapa universitaria.

En segundo lugar, agradecer a mi familia y amigos, por estar el pie del cañón, por soportarme hasta los días en los que no me soportaba ni yo y por no dudar de mí ni un segundo. Hoy soy lo que soy gracias a vosotros.

Finalmente, agradecer a todos mis compañeros de carrera durante estos cuatro años. En especial a Victoria y Lucía, por ser mi mano derecha y mi mano izquierda, por ser mi motor, por confiar en mí y sobre todo por convertiros en amigas. Me llevo mil risas y mil experiencias. Gracias por todo, nada de esto hubiera sido lo mismo sin vosotras.

ÍNDICE

1. Capítulo 1: Introducción	6
1.1 Motivación	6
1.2 Objetivo	6
1.3 Estructura de la memoria	7
2. Capítulo 2: Radar de apertura sintética	9
2.1 Conceptos básicos del SAR	9
2.2 Comportamiento de los canales polarimétricos	12
2.3 Satélites Sentinel-1	14
3. Capítulo 3: Desarrollo del estudio	18
3.1 Área de estudio	18
3.2 Metodología	18
4. Capítulo 4: Resultados	26
4.1 Histogramas	26
4.2 Series temporales	32
4.2.1 Canales VV y VH	32
4.2.2 Relación VH/VV	36
4.3 Clasificador de máxima verosimilitud (ML)	37
5. Capítulo 5: Conclusiones	41
5.1 Objetivos cumplidos	41
5.2 Líneas futuras de trabajo	42
Índice de tablas	43
Índice de figuras	44
Bibliografía	46

CAPÍTULO 1

1. Capítulo 1: Introducción

1.1 Motivación

Desde hace más de diez años la deforestación tropical por plantación de palma aceitera en el país de Gabón se está convirtiendo en uno de los principales problemas tanto a nivel nacional como global [1,2]. Se llevan firmando acuerdos de “Deforestación cero” casi desde que se comenzó con la deforestación, sin embargo, el compromiso de las empresas de explotación del aceite de palma e instituciones adheridas a este plan brilla por su ausencia. Las comunidades indígenas que ancestralmente han habitado las zonas donde se ubican estas plantaciones viven en pésimas condiciones, en especial, las mujeres que son el colectivo más desfavorecido. La teledetección y monitorización de estas áreas puede ayudar a dar visibilidad y a concienciar sobre las condiciones en las que viven estas comunidades y el medio natural que se está destruyendo.

Me siento afortunada, por un lado, de poder formar parte, aunque sea en pequeña medida, de un proyecto que puede ayudar a miles de personas y al medio ambiente. Y, por otro lado, de iniciarme en el mundo del procesado de imágenes radar de satélite, abriéndome una nueva vía a la que poder dedicarme en un futuro.

1.2 Objetivo

El objetivo de este proyecto es estudiar la información aportada por las imágenes SAR (Radar de Apertura Sintética) obtenidas sobre zonas de monocultivo industrial de la palma aceitera. Para ello, se dispone de una serie temporal de imágenes del satélite Sentinel-1 de la Agencia Espacial Europea (ESA) adquiridas en una misma zona geográfica del país Gabón, en África. En concreto, nos centraremos en el estudio de la sensibilidad de la potencia retrodispersada de los canales VV y VH en banda C, que es la frecuencia del sensor radar de Sentinel-1.

Además, también se comprobará la consistencia de los resultados de trabajos previos en zonas de monocultivo industrial de Indonesia y se analizará la potencial generalización de los resultados independientemente de la zona geográfica.

Para realizar este trabajo, se dispone, como ya se ha mencionado, de imágenes radar del satélite Sentinel-1 sobre un área en la ciudad de Mouilá en el país de Gabón, afectada desde hace años por la deforestación tropical. En esta zona las concesiones para la industria de la palma de aceite comenzaron a operar en 2012 con la limpieza de las áreas seleccionadas. No obstante, según la organización medioambiental Mighty Earth [3], el rendimiento total de aceite de palma de estas concesiones fue inferior al 1% en 2015. En realidad, los ecosistemas naturales africanos han sufrido hasta ahora un daño relativamente pequeño en comparación con el sudeste asiático, donde la amplia expansión de la actividad industrial del monocultivo se ha concentrado hasta los últimos años. Esto brinda una valiosa oportunidad para estudiar las firmas Sentinel-1 simultáneamente al inicio de la etapa de crecimiento inicial de las plantas de palma aceitera y comparar estas firmas con las del bosque tropical para este ecosistema en particular.

1.3 Estructura de la memoria

La memoria se estructura en 5 capítulos. En el capítulo dos se explican los conceptos básicos del SAR, el comportamiento de los canales polarimétricos, así como las características del satélite Sentinel-1 empleado. En el capítulo 3 se describe el área en la que se ha desarrollado nuestro estudio y la metodología empleada para ello. En el capítulo 4, se analizan los resultados obtenidos del análisis de los histogramas para las zonas de estudio consideradas y de las series temporales, así como unos primeros resultados obtenidos mediante el clasificador de máxima verosimilitud. Finalmente, en el capítulo 5 se discute sobre el trabajo realizado y los objetivos conseguidos. Además, se mencionan futuras líneas de estudio como continuación de este trabajo.

CAPÍTULO 2

2. Capítulo 2: Radar de apertura sintética

2.1 Conceptos básicos del SAR

El SAR (Radar de Apertura Sintética) [4,5] ha sido el sistema empleado para obtener las imágenes satelitales en este trabajo. Con ellas se han podido obtener los datos estadísticos y cualitativos para llevar a cabo el análisis necesario y extraer información sobre el crecimiento de las plantaciones de palma aceitera.

El radar de apertura sintética SAR es un radar activo que emite señales en el intervalo de frecuencias de microondas (450 MHz, 1,3 GHz o 5,4 GHz como en el caso que nos ocupa, entra muchas otras bandas), en un período pequeño de tiempo y recibe los ecos provenientes de reflexiones de la zona de interés. En este trabajo la banda de frecuencia empleada ha sido la banda C (de 4GHz a 8GHz).

Con este sistema se obtiene una resolución de la imagen mucho mejor que la correspondiente a un radar de apertura real (RAR) ya que el SAR explora una escena mediante una antena de dimensión l , que recorre un camino de longitud L_s , como se observa en le **Figura 1**.

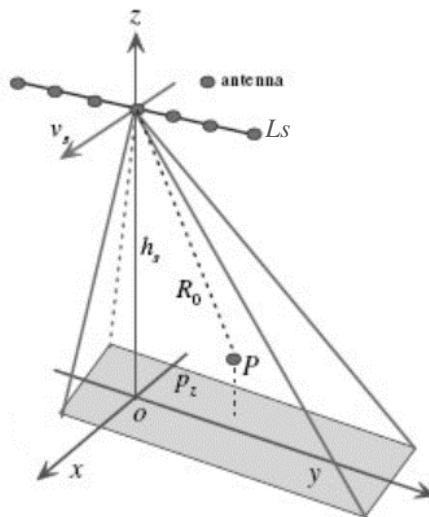


Figura 1- Concepto del procesado SAR [4].

El SAR se basa en la estimación del retardo de la señal retrodispersada. Con el retardo temporal entre los ecos de radar recibidos determina su distancia.

A través de un circulador, el sistema manda a la antena mediante un transmisor de pulsos de microondas, un pulso radar de alta potencia tal y como se puede observar en la **Figura 2**.

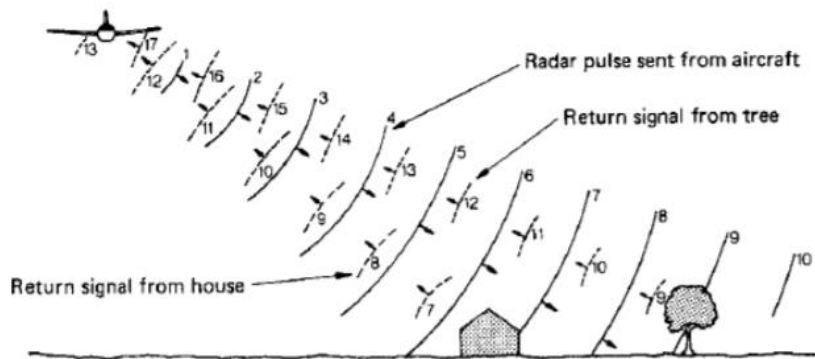


Figura 2 - Propagación de un pulso emitido por el radar [10].

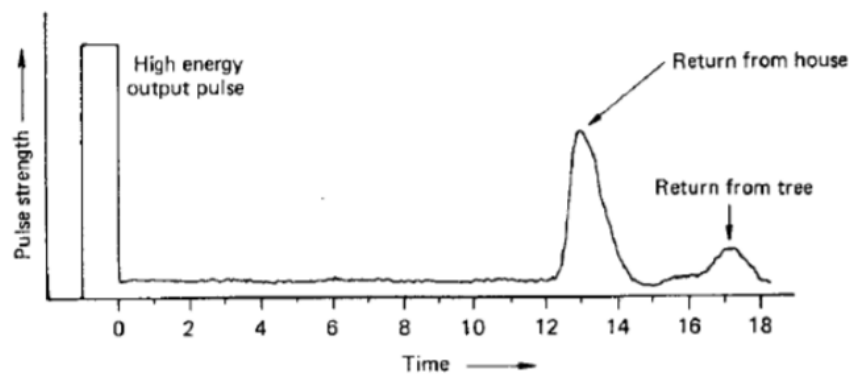


Figura 3 - Pulso que recibe el receptor [10].

Como se puede ver tanto en la **Figura 2** como en la **Figura 3**, este pulso se radia por la antena y, al incidir en el blanco, parte de la energía vuelve de vuelta al receptor y se almacena.

El radar está montado sobre una plataforma móvil que se mueve a lo largo de un camino al cual se le conoce como **azimut**. El haz de la antena está orientado respecto al suelo con cierta inclinación y es perpendicular al camino que sigue la antena, de esta manera se define el **rango** (*range*).

El procesamiento de todos los ecos recibidos en los diferentes puntos del camino que recorre la antena se le conoce como enfoque o procesamiento SAR. En este caso la **resolución en azimut** se expresa como:

$$\delta_a = \frac{l}{2}$$

Donde l es la dimensión más grande de la antena. Como se observa, la resolución en azimut no depende de la distancia entre el sensor y el blanco. Según la expresión anterior, si la longitud de la antena (un *phased array*) es de 12 m, esto supone que la resolución en azimut sería de 6 m. Por el contrario, un radar de apertura real ofrece una resolución en azimut que depende de la distancia al blanco y la longitud de onda, además de l . Los valores de δ_a estarían del orden de unos pocos kilómetros en ese caso.

La **resolución de rango** se define de la siguiente manera:

$$\delta_s = \frac{c}{2B}$$

Donde c , es la velocidad de la luz y B el ancho de banda de la señal utilizada

Por otro lado, a la resolución de dos objetos sobre la superficie terrestre se le conoce como **resolución en tierra** y se define como:

$$\delta_g = \frac{c}{2B \sin(\theta)}$$

Donde θ es el ángulo de incidencia del radar durante la exploración.

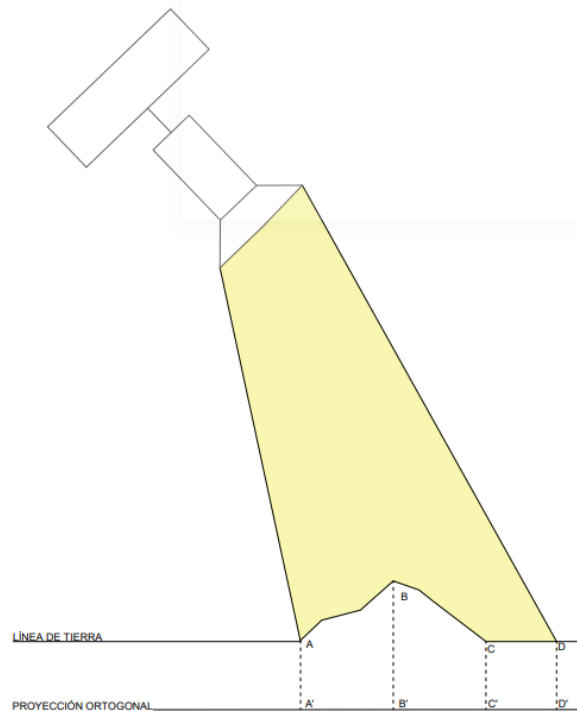


Figura 4 - Geometría de la imagen.

Otro efecto a tener en cuenta en este proyecto es la geometría de la imagen. Consideremos la montaña de la **Figura 2**. Los puntos A, B y C están igualmente espaciados cuando se proyectan verticalmente en el suelo. Sin embargo, la diferencia de distancia estimada a través de los ecos recibidos de A y B es considerablemente más corta en comparación con la estimada a través B y C, debido a que la cima de la montaña está relativamente cerca del sensor SAR en comparación con el punto A. Este fenómeno es muy común en las zonas montañosas o con mucha vegetación donde las montañas y los árboles parecen “inclinarse” hacia el sensor, como es el caso de la zona de estudio de este trabajo. Existen otro tipo de distorsiones geométricas que se han de tener en cuenta, especialmente en zonas con cierta topografía, si bien en muchos casos se pueden eliminar o minimizar mediante técnicas apropiadas [6].

2.2 Comportamiento de los canales polarimétricos

Para una onda electromagnética, la polarización se refiere a la orientación y forma del patrón trazado por la punta del vector, que representa el campo eléctrico de la señal que emite un radar. Según la combinación entre la dirección del campo transmitido y el recibido, se dispondrá de diferentes canales polarimétricos.

Las señales radar pueden transmitirse como campos electromagnéticos independientemente de la longitud de onda, estos campos pueden ser horizontales (H) o verticales (V) y se pueden recibir de vuelta como señales horizontales (H), verticales (V) o ambas. Por lo tanto, existen las siguientes posibilidades en la emisión-recepción de la radiación polarizada:

- **HH:** transmitida horizontalmente y recibida horizontalmente.
- **HV:** transmitida horizontalmente y recibida verticalmente.
- **VH:** transmitida verticalmente y recibida horizontalmente.
- **VV:** transmitida verticalmente y recibida verticalmente.

Las combinaciones de polarización HH y VV se denominan “polarizaciones copolares” porque las polarizaciones de transmisión y recepción son las mismas. Por otro lado, las combinaciones de polarización HV y VH se denominan “contrapolarizadas” o “cross-polares” porque las polarizaciones de transmisión y recepción son ortogonales entre sí.

Los sistemas de radar pueden tener una, dos o las cuatro combinaciones de polarización de transmisión/ recepción:

- **HH o HV (o también HV o VH):** Polarización simple.
- **HH y HV, VV y VH o HH y VV:** Polarización dual.
- **HH y VH, alternando con VV y VH:** Polarización alterna.
- **HH, VV, HV y VH:** Polarimétrico.

El comportamiento de los canales polarimétricos influye a la hora de obtener las imágenes radar ya que afecta a como el radar “ve” los elementos de la escena. Cuanto mayor sea la rugosidad del terreno mayor será la retrodispersión y por lo tanto, la imagen se verá más brillante, es decir, las superficies lisas como ríos reflejan poca o ninguna de la energía transmitida por él, y por lo tanto aparecerán oscuras en la imagen final. Sin embargo, las superficies rugosas, como son ciertos tipos de suelo, o bien superficies con mucha vegetación aparecerán representadas en tonos grises en la imagen del radar. La constante dieléctrica de un material o una superficie también influye, cuanto más alta sea mayor será la retro-dispersión y por lo tanto más brillante

aparecerá el píxel en la imagen radar. En la Figura 3 se muestra el efecto de la rugosidad del terreno, mientras que en la Figura 4 se indica cómo una zona con vegetación induce diferentes respuestas (mecanismos de scattering) según la complejidad morfológica y biofísica del medio.

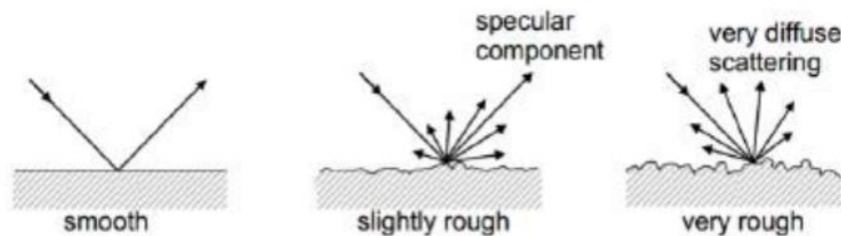


Figura 5 - Tipos de reflexión de un pulso radar según la rugosidad de una superficie [10].

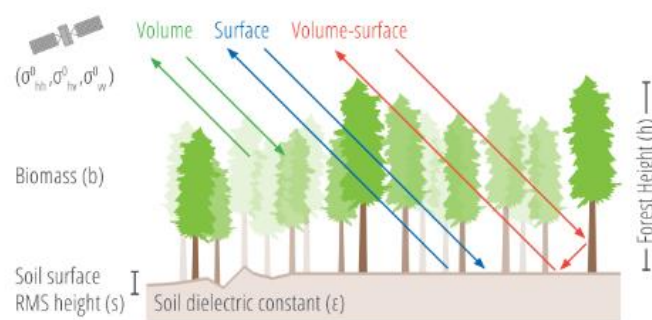


Figura 6 - Tipos de reflexión de un pulso en una zona de vegetación complejidad morfológica y biofísica del medio [8].

2.3 Satélite Sentinel-1

El satélite Sentinel-1 se compone de una constelación de dos satélites (Sentinel-1A y Sentinel-1B) en órbita polar que operan día y noche y generan imágenes de radar de apertura sintética SAR en banda-C que operan en cuatro modos con diferente resolución y cobertura. Proporciona capacidad de polarización dual, tiempos de revisión muy cortos y entrega rápida del producto. Para cada observación, se dispone de mediciones precisas de la posición y altitud de la nave espacial.

De entre la gran variedad de aplicaciones que lleva a cabo el sistema Sentinel-1, la más importante y destacable es la observación de la superficie. Para poder llevar a cabo estas aplicaciones se necesita que el sistema se configure y se adecúe para cada una de ellas, por este motivo, el sistema del satélite se puede configurar de diferentes maneras para poder aprovechar o maximizar la obtención de información.

En esta tabla se pueden ver todas sus características generales:

	Sentinel-1
Agencia	European Space Agency (ESA)
Instrumento	SAR en banda-C (5.4GHz)
Angulo de incidencia	15-45°
Polarización	VV y VH o HH y HV
Altura del sensor en la línea ecuatorial	693 km
Órbita	Heliosincrónica (anohecer/amanecer)
Tiempo de Revisita (Ciclo de Repetición Orbital)	12 días
Vida útil programada	7 años

Tabla 1 - Características generales del Satélite Sentinel- 1[12].

Los cuatro modos de medición exclusivos en los que opera el satélite Sentinel-1 son los siguientes:

- *Inferiometric Wideswath Mode*
- *Wave Mode*
- *Stripmap Mode*
- *Extra-Wideswath Mode*

Todos estos modos, excepto el *Wave Mode*, opera el sistema SAR que permite trabajar en doble polarización (HH y HV, VV y HH) y requiere la implementación de un sistema de transmisión que pueda seleccionar H o V y dos sistemas de recepción simultáneos para las polarizaciones en H y V. Sin embargo, como ya se ha comentado antes, el *Wave Mode* solamente utiliza un modo simple de polarización (HH o VV).

Además, todos estos modos pueden producir productos en SAR de cuatro tipos:

- **Nivel-0:** En este caso los productos son una secuencia de datos sin aplicar el procesado SAR.
- **Nivel-1 SLC:** En este tipo los productos consisten en muestras complejas de amplitud y fase.
- **Nivel-1 GRD:** El producto resultante de este nivel tiene una resolución peor que el anterior ya que se pierde la información de fase, es decir, sólo proporciona la potencia retrodispersada. Este es el producto que hemos utilizado en este trabajo.
- **Nivel-2 OCN:** Este producto incluye componentes para espectros de oleaje oceánico.

Como ya se ha comentado, para este proyecto el tipo de producto que se ha utilizado es el Nivel-1 GRD. Las imágenes obtenidas de este tipo, a su vez, se pueden clasificar por su resolución: resolución completa (FR), resolución alta (HR) y resolución media (MR). Dependiendo del modo de medición que se use o se necesite para obtener la imagen, la resolución de esta variará, en este proyecto se han empleado las imágenes GRD de modo IV y de resolución HR. Se puede observar en la **Tabla 2**.

Modo	Tipo de resolución	Resolución (rango x azimuth) [m]	Espaciado de píxeles (rango x azimuth) [m]
SM	FR	9 x 9	3.5 x 3.5
	HR	23 x 23	10 x 10
	MR	84 x 84	40 x 40
IW	HR	20 x 22	10 x 10
	MR	88 x 87	40 x 40
EW	HR	50 x 50	25 x 25
	MR	93 x 87	40 x 40
WV	MR	52 x 51	25 x 25

Tabla 2 - Resoluciones para imágenes GRD [7].

CAPÍTULO 3

3. Capítulo 3: Desarrollo del estudio

3.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra cerca del municipio de Mouila, provincia de Ngounie en Gabón, África. En la **Figura 7** se muestra la localización de la zona de estudio con un rectángulo rojo.



Figura 7 - Localización geográfica del área de estudio en Gabón. Con un rectángulo rojo se marca la zona en particular para este proyecto. Imagen obtenida usando Google Earth.

El inicio de la deforestación de Gabón ocurre a partir del año 2012 aunque no es hasta 2015 donde empieza la deforestación a gran escala [3,16]. En la **Figura 8**, se muestra un mapa generado por la empresa [16] en mayo de 2015. En él podemos ver como las plantaciones de palma han sustituido las partes de bosque autóctono y sabana del lugar. Además, se puede observar que el objetivo de estas empresas e instituciones era convertir la mayor parte del terreno en plantaciones de palma aceitera.

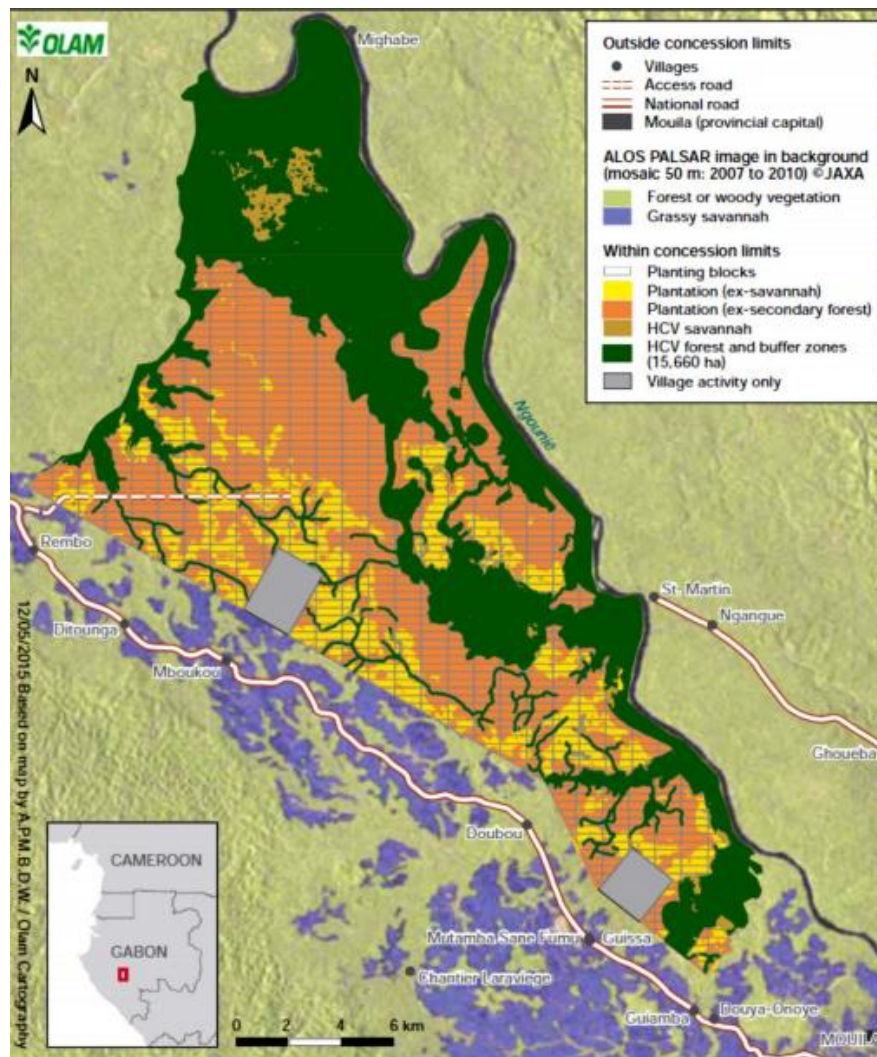


Figura 8 - Mapa de referencia del área de estudio [16].

En color amarillo se muestran las plantaciones de palma que se han ubicado en zonas de sabana. En naranja, las plantaciones de palma que han sustituido lo que la empresa denomina como “bosques secundarios”, la zona que más afectada por la deforestación. En marrón están las zonas de sabana que se han respetado y en verde el bosque que tampoco se ha deforestado.

Esta información, junto con una preselección inicial de las imágenes, permite identificar las áreas recientemente despejadas o donde la plantación acaba de realizarse. Se debe tener en cuenta que la plantación en el campo se lleva a cabo de 6 a 12 meses después de que las semillas pregerminadas se siembran y se crían [14]. De hecho, esta es una característica interesante para el objetivo de este proyecto, ya que el análisis de sensibilidad a la retrodispersión se lleva a cabo simultáneamente al inicio de la etapa de crecimiento inicial de las plantaciones de palma aceitera.

La Figura 9 muestra una vista donde los polígonos coloreados corresponden a las áreas consideradas en este estudio. La letra B hace referencia a los polígonos que corresponden a las zonas de bosque, la S hace referencia al polígono de la zona de la sabana. Dado que esta zona era muy minoritaria es suficiente con un polígono para estudiarlo. Finalmente, la P corresponde con los polígonos de las plantaciones de palma aceitera.

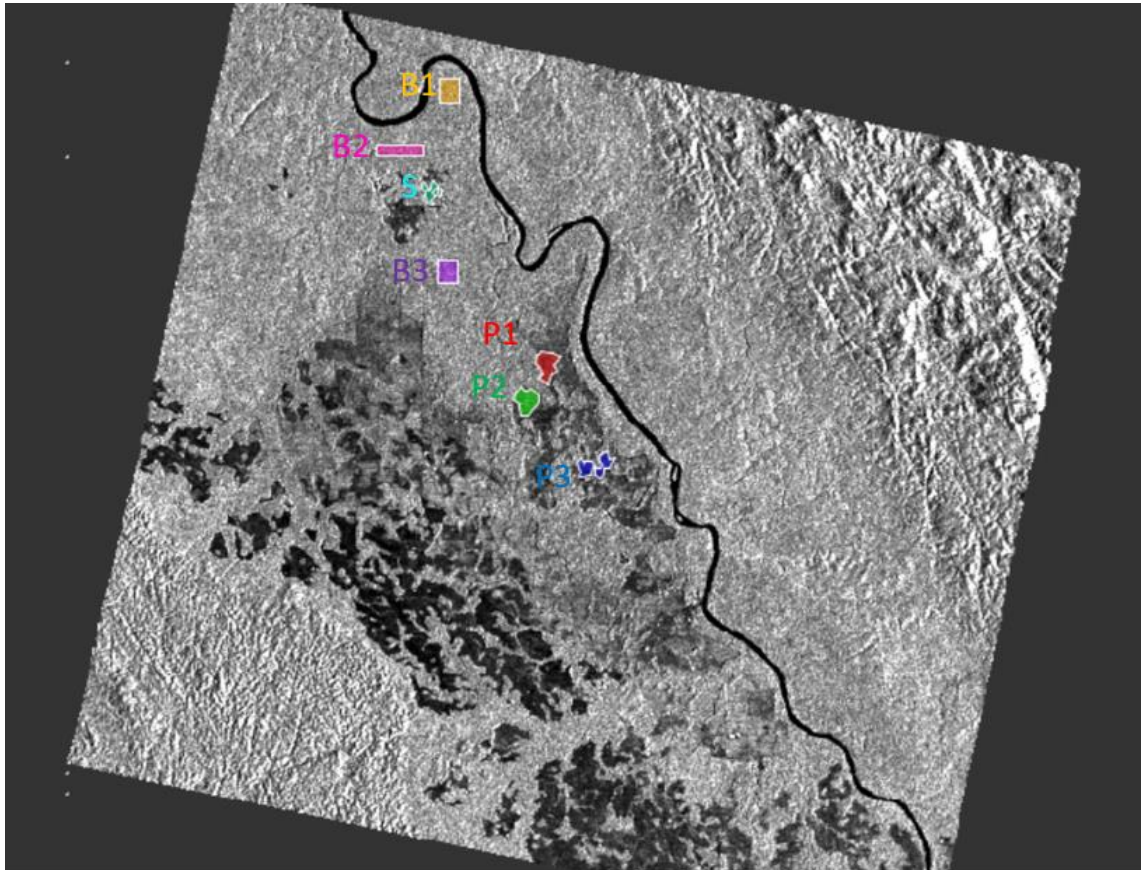


Figura 9 - Vista de los polígonos escogidos en la imagen del 14 de abril de 2015 para el canal VV. Las imágenes SAR se han obtenido del portal de datos Alaska Satellite Facility's [17].

Los productos SAR se descargaron del portal Alaska Satellite Facility's [17]. En total se utilizaron 13 imágenes GRDH (modo IW) en paso descendente y órbita 153 con un intervalo de tiempo de casi un año entre cada una de ellas. Todos los productos, se obtuvieron en la temporada de lluvia o temporada húmeda. Los productos usados se muestran en la **Tabla 3**.

FECHA (AAAA/MM/DD)	Nombre del archivo
2015 04 14	S1A_IW_GRDH_1SDV_20150414T045839_20150414T045904_005475_006FE0_6FF2
2016 04 08	S1A_IW_GRDH_1SDV_20160408T045846_20160408T045911_010725_01000B_187D
2017 04 03	S1A_IW_GRDH_1SDV_20170403T045851_20170403T045916_015975_01A589_FED7
2018 04 10	S1A_IW_GRDH_1SDV_20180410T045857_20180410T045922_021400_024D7F_0D61
2019 04 17	S1A_IW_GRDH_1SDV_20190417T045904_20190417T045929_026825_0303D9_931E
2020 04 11	S1A_IW_GRDH_1SDV_20200411T045910_20200411T045935_032075_03B4E6_0042
2021 02 05	S1A_IW_GRDH_1SDV_20210205T045916_20210205T045941_036450_044767_FC82

Tabla 3 - Fecha y nombre de los productos SAR obtenidos del portal ASF DAAC.

3.2 Metodología

Todos los productos anteriormente comentados (apartado 3.1) se han procesado con el software SNAP de la ESA de código abierto. La etapa de preprocesado se ha llevado a cabo realizando los siguientes pasos para los canales VH y VV de cada una de las imágenes:

1. **Subset de las imágenes (Subset).** El intervalo de latitud se estableció de 1.46 °S a 1.87 °S y el de longitud de 10.74 °E a 11.04 °E. Por lo tanto, el área cubierta es de alrededor de 40 x 37 km. Este paso se ha realizado con la intención de minimizar los tiempos de preprocesado, ya que, los productos obtenidos, eran imágenes mucho más grandes de las cuáles solo nos interesaba esa parte.
2. **Aplicar información de órbita (Apply orbit file).** Los vectores de estado de la órbita proporcionados en el producto SAR generalmente no son precisos. Al aplicar este paso nos aseguramos de que se comparen con los archivos de órbita precisos sobre la posición y velocidad del satélite y se actualicen si no son precisos.
3. **Eliminación del ruido térmico (Thermal Noise Removal).** Compara los valores del producto con los perfiles de ruido calibrados que coinciden con los datos GRD calibrados y los corrige.
4. **Calibración para obtener los valores *gamma* (Calibration: gamma).** Hace referencia a la calibración del backscattering. Significa que aplicas un

procedimiento para saber que la potencia retrodispersada que el sensor está midiendo por unidad de superficie en un píxel en concreto representa el *target* observado. Si la potencia que recibe el radar se normaliza por el área A_γ (como se ve en la **Figura 10**) se obtiene los valores de gamma calibrados.

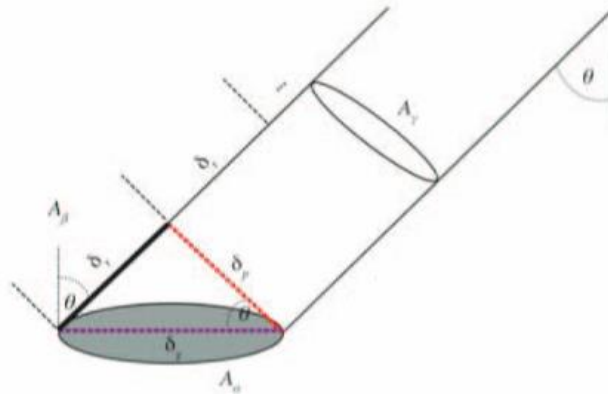


Figura 10 - Convenciones de normalización de retrodispersión: Beta, Sigma y Gamma

5. **Corregistración de todas las imágenes (Corregistration).** Este paso se realiza para comparar ~~des~~ varias imágenes tomadas en el mismo lugar porque, aunque la imagen esté tomada de la misma zona, aparecen diferencias en las ubicaciones exactas de los píxeles. Este paso comprueba que haya correlación máxima entre las imágenes, es decir, que a nivel temporal dos puntos de cada imagen coincidan geográficamente. Con ello nos aseguramos de que estamos analizando el mismo punto geográfico en la superficie terrestre.
6. **Filtro de speckle (Speckle filter).** Se elimina este ruido utilizando un filtro *boxcar* 9x9. ~~a~~ Al tratarse de un sensor coherente, es decir, las magnitudes medidas se caracterizan por amplitud y fase, aparece el ruido speckle, el cual se debe minimizar. Además, al estar estudiando una zona con mucha vegetación la contribución del speckle es aún mayor. Por lo tanto, aplicando este filtro reducimos las interferencias constructivas y destructivas generadas y que se manifiestan al generar la imagen y nos permite, tanto apreciar la imagen de una manera más homogénea, como poder realizar una estimación cuantitativa de parámetros correcta.

7. **Corrección del terreno (Terrain correction).** Hace una interpolación y una proyección de la imagen, es decir, el radar mira el terreno con un ángulo de inclinación, pero la imagen final que queremos para analizar correctamente el terreno es una imagen como si el radar mirara directamente desde arriba al terreno, es decir una proyección. Gracias a este paso eliminamos todas las distorsiones geométricas de la imagen y obtenemos una imagen del terreno fiel a la realidad.

Una vez realizados todos estos pasos, se han obtenido los valores medios, la desviación estándar y los coeficientes de variación de los canales VH y VV para cada área seleccionada (ver **Figura 9**) y para cada año conformando una serie temporal que abarca la totalidad de los 6 años del período.

La evolución temporal de la retrodispersión media VH y VV, así como la relación VV/VH se han representado y analizado en términos del desarrollo del crecimiento de las palmas de aceite durante las primeras etapas desde la plantación. Se ha asumido que los datos de referencia proporcionados en [3] y [16] son lo suficientemente precisos para la selección adecuada de las clases correspondientes, es decir, de las clases elegidas en la **Figura 10**. Además, se ha asumido que existe la homogeneidad dentro del polígono en particular.

La **Tabla 4** muestra el número de píxeles contenidos en cada polígono (ver la **Figura 9** para la asignación de etiquetas a cada clase). Por un lado, estos números son lo suficientemente altos como para reflejar el comportamiento estadístico de cada clase. Por otro lado, se ha asegurado que los píxeles pertenecientes a la misma clase estén dentro de cada área particular mediante un análisis del histograma.

Etiqueta del polígono	Nº de píxeles
B1	10353
B2	10633
B3	10235
P1	10408
P2	10527
P3	9975
S	4765

Tabla 4 - Número de píxeles contenidos en cada polígono considerados en este trabajo.

Finalmente, para ilustrar cómo ha cambiado la superficie desde 2015 a 2021 debido a la deforestación por la plantación de palma se ha utilizado un **clasificador de máxima verosimilitud (ML)**, también integrado en el software SNAP. Este clasificador se trata de una clasificación supervisada en el que un píxel se clasifica en la clase correspondiente según la máxima probabilidad encontrada en base a la etapa previa de asignación de clases. Para ello se usan los polígonos de la **Figura 9**, es decir, se eligen las zonas que se quieren clasificar (a lo que llaman vectores de entrenamiento) en una o varias imágenes y con ello el clasificador denomina una clase a la que el píxel puede pertenecer con máxima probabilidad y lo clasifica como bosque, palma o sabana.

CAPÍTULO 4

4. Capítulo 4: Resultados

4.1 Histogramas

La **Figura 11** y la **Figura 12** muestran los histogramas de los polígonos de bosque etiquetados como B1, de palma aceitera etiquetados como P1 y de sabana etiquetado como S, para la primera y última imagen, es decir para los años 2015 y 2021, respectivamente. Se representan los histogramas para el valor medio de retrodispersión con el fin de ilustrar el comportamiento de las tres clases. En esta memoria únicamente se mostrarán los histogramas de 2015 y 2021, el resto no se muestran aquí, ya que no proporcionan información adicional al representar distribuciones similares.

Para los bosques, los valores de retrodispersión de VH y VV se mantienen constantes a lo largo de todo el período. Sin embargo, los valores de 2021 respecto con los de 2015 muestran una ligera variabilidad, esto se podría deber a variaciones de las condiciones ambientales.

Para la sabana, ocurre algo similar, los valores de retrodispersión se mantienen constantes, pero existe una diferencia entre los valores de 2015 y los de 2021. Que al igual que para los bosques, esta alteración se podría deber a cambios ambientales. Finalmente, para la palma aceitera sí que se observan cambios significativos, los valores de retrodispersión muestran una mayor variabilidad a lo largo del tiempo.

Para el gráfico de 2015 en el canal VH muestra un máximo en -16 dB lo que nos lleva a afirmar que se trata de una superficie en la que aún no se ha plantado palma o esta se acaba de plantar y aún no ha crecido. Para este caso, se puede observar que existe una diferencia notable en el valor medio de la retrodispersión de las tres clases, lo cual permite diferenciarlas sin problema.

En cambio, en el gráfico del canal VH de 2021, el cambio del valor de la retrodispersión para la palma es significativo, aun así, sigue más bajo que el de los bosques. Por el contrario, en el canal VV el valor de retrodispersión supera al de los bosques.

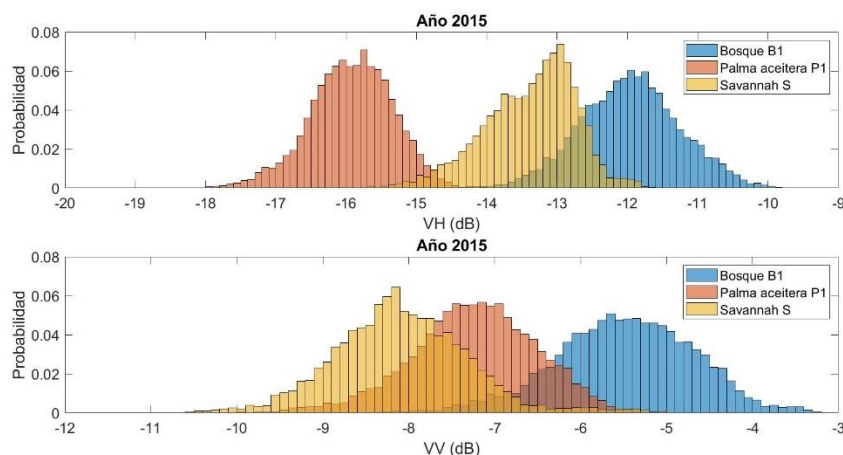


Figura 11 - Histogramas de retrodispersión para el año 2015, para bosques B1, plantación de palma aceitera (P1) y sabana (S). En el histograma superior se puede ver el resultado para el canal VH y en el inferior el resultado para el canal VV en dB.

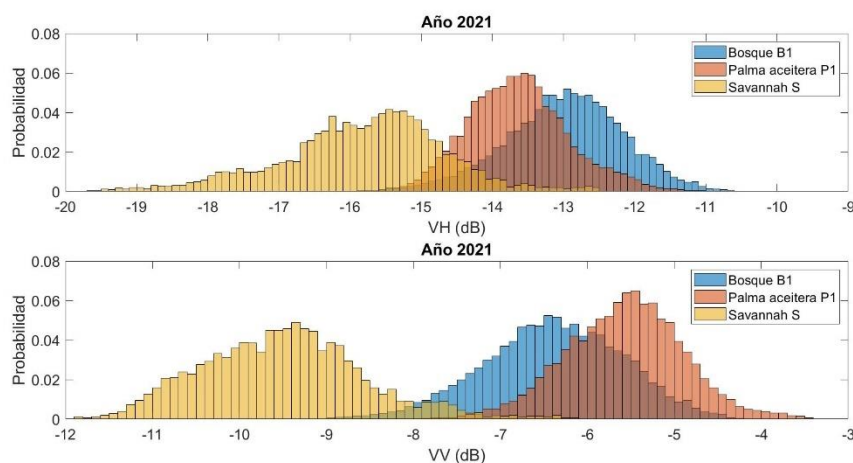


Figura 12 - Histogramas de retrodispersión para el año 2021, para bosques B1, plantación de palma aceitera (P1) y sabana (S). En el histograma superior se puede ver el resultado para el canal VH y en el inferior el resultado para el canal VV en dB.

En las **figuras 13 y 14** se representan los histogramas en escala lineal para hacer más fácil la comparación con las tablas que se adjuntan abajo.

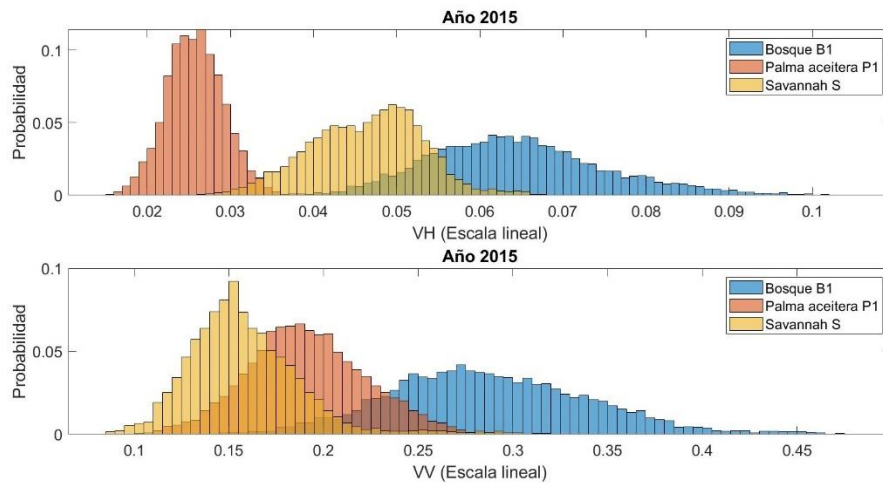


Figura 13 - Histogramas de retrodispersión para el año 2015, para bosques B1, plantación de palma aceitera (P1) y sabana (S). En el histograma superior se puede ver el resultado para el canal VH y en el inferior el resultado para el canal VV en escala lineal.

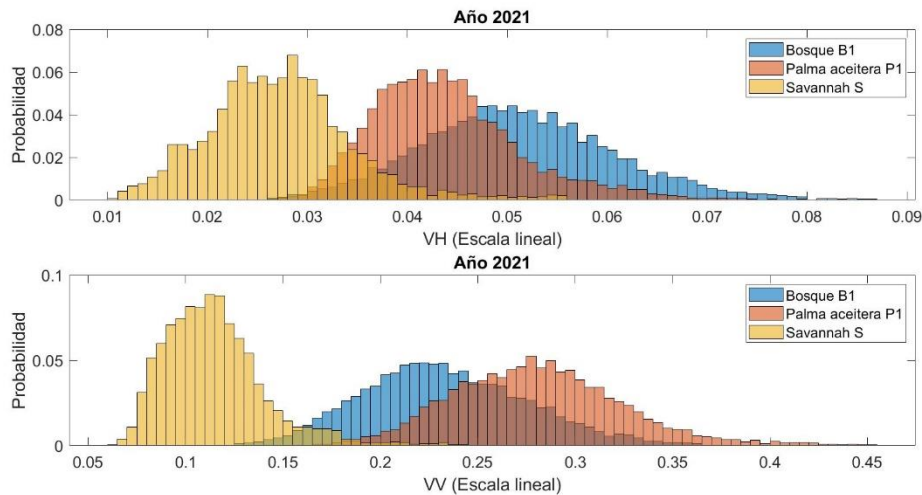


Figura 14 - Histogramas de retrodispersión para el año 2021, para bosques B1, plantación de palma aceitera (P1) y sabana (S). En el histograma superior se puede ver el resultado para el canal VH y en el inferior el resultado para el canal VV en dB.

En las tablas siguientes (**Tabla 5**, **Tabla 6** y **Tabla 7**) se muestra el valor medio, la desviación estándar y el coeficiente de variación para todos los polígonos en 2015. En las tablas **Tabla 8**, **Tabla 9** y **Tabla 10** se muestra la misma información, pero para el año 2021.

- **2015:**

BOSQUE	VH			VV		
	B1	B2	B3	B1	B2	B3
Media	0,0647	0,0665	0,0650	0,2887	0,3008	0,3007
Desviación típica	0,0106	0,0102	0,0109	0,0529	0,0512	0,0496
Coefficiente de variación estándar	16,33%	15,39%	16,77%	18,32%	17,03%	16,48%

Tabla 5 - Resultado del análisis estadístico para los tres subsets de bosque en 2015.

SABANA	VH	VV
	S	S
Media	0,0465	0,1584
Desviación típica	0,0067	0,0304
Coefficiente de variación estándar	14,37%	19,19%

Tabla 6 - Resultado del análisis estadístico para el subset de sabana en 2015.

PALMA ACEITERA	VH			VV		
	B1	B2	B3	B1	B2	B3
Media	0,0258	0,0328	0,0297	0,1915	0,1955	0,1763
Desviación típica	0,0035	0,0067	0,0053	0,0312	0,0372	0,0329
Coefficiente de variación estándar	13,41%	20,50%	17,78%	16,27%	19,05%	18,64%

Tabla 7 - Resultado del análisis estadístico para los tres subsets de palma aceitera en 2015.

- **2021:**

BOSQUE	VH			VV		
	B1	B2	B3	B1	B2	B3
Media	0,0511	0,0512	0,0469	0,2340	0,2424	0,2236
Desviación típica	0,0096	0,0090	0,0083	0,0403	0,0419	0,0371
Coefficiente de variación estándar	18,71%	17,59%	17,75%	17,22%	17,29%	16,57%

Tabla 8 - Resultado del análisis estadístico para los tres subsets de bosque en 2021.

SABANA	VH	VV
	S	S
Media	0,0267	0,1145
Desviación típica	0,0071	0,0260
Coefficiente de variación estándar	26,65%	22,73%

Tabla 9 - Resultado del análisis estadístico para los tres subsets de sabana en 2021.

PALMA ACEITERA	VH			VV		
	B1	B2	B3	B1	B2	B3
Media	0,0439	0,0498	0,0462	0,2810	0,2870	0,2802
Desviación típica	0,0074	0,0079	0,0084	0,0435	0,0420	0,0460
Coefficiente de variación estándar	16,97%	15,94%	18,11%	15,49%	14,65%	16,40%

Tabla 10 - Resultado del análisis estadístico para los tres subsets de palma aceitera en 2021.

- **Comparación con los resultados obtenidos en estudios anteriores en la zona de Riau en Indonesia.**

Estos resultados están obtenidos de imágenes SAR realizadas con el satélite Sentinel-1 para el año 2014 para la zona de Riau en Indonesia [18].

BOSQUE	VH	VV
Media	0,0552	0,2136
Coefficiente de variación	17,39%	20,05%

Tabla 11 - Resultado del análisis estadístico para el subset de bosque en Indonesia [18]

PALMA ACEITERA	VH	VV
Media	0,0634	0,3195
Coefficiente de variación	11,60%	13,35%

Tabla 12 - Resultado del análisis estadístico para el subset de palma aceitera en Indonesia [18].

Estos resultados se comparan en la **Tabla 13** y la **Tabla 14** con un subset 1 de cada clase que se ha analizado en el presente estudio, es decir, con el subset 1 de bosque y con el subset 1 de palma. Además, se van a comparar con los subsets tomados en la imagen de 2021 ya que, como se ha comprobado anteriormente para 2015, la palma aún no había crecido.

BOSQUE	INDONESIA		GABÓN	
	VH	VV	VH	VV
Media	0,0552	0,2136	0,0511	0,234
Coefficiente de variación	17,39%	20,05%	13,41%	17,22%

Tabla 13 - Comparación de los resultados del análisis estadístico para los subsets de bosque de Indonesia y Gabón.

PALMA ACEITERA	INDONESIA		GABÓN	
	VH	VV	VH	VV
Media	0,0634	0,3195	0,0439	0,281
Coefficiente de variación	11,60%	13,35%	16,97%	15,49%

Tabla 14 - Comparación de los resultados del análisis estadístico para los subsets de palma de Indonesia y Gabón.

Como se puede observar, para el bosque, los valores medios de retrodispersión para ambos canales varían como máximo 1 dB respecto a los que se obtuvieron en Indonesia. En el coeficiente de variación se aprecia una variación más notable entre las dos zonas, esto puede ser debido a los diferentes ecosistemas tropicales considerados.

Para la palma aceitera los valores medios de retrodispersión para ambos canales difieren bastante de una zona a la otra. Esto se podría deber a que la plantación de Indonesia en 2014 había alcanzado el máximo crecimiento. Por lo contrario, en Gabón en 2021 podría ser que aún no se haya alcanzado la máxima altura de la palma, la cual se consigue a partir de los 10 años [18].

También podría ser que las palmas aceiteras plantadas en cada zona pertenezcan a tipos distintos de palma y por lo tanto unas crezcan más que las otras, al igual que hemos intuido con las zonas de bosque.

4.2 Series temporales

4.2.1 Canales VV y VH

Las series temporales entre 2015 y 2021 de los valores medios de retrodispersión para los canales VH y VV de todas las clases se representan en las **Figuras 15 y 16**. Nos hemos centrado en este valor para realizar el análisis, aunque también se han obtenido las series temporales de la desviación típica y el coeficiente de variación estándar para complementar estos resultados.

Las series temporales de los bosques se representan junto a la serie temporal de la sabana.

Las etiquetas de Area 1, Area 2 y Area 3, corresponden a los polígonos etiquetados anteriormente como B1, B2 y B3. Ocurre lo mismo para la palma.

Como se puede observar en la **Figura 15**, en el caso de los bosques, tanto para la retrodispersión VH y VV se mantienen niveles con poca variación a lo largo de todo el período. Sin embargo, los valores para el año 2015 y 2021 muestran una variabilidad apreciable que contribuye a ampliar el rango dinámico 1-1,5 dB, esto se podría deber a variaciones de las condiciones ambientales, como condiciones de humedad.

Para la sabana, ocurre algo similar a esto, como se puede observar. Los valores para 2015 y 2021 también difieren, lo que nos lleva a ampliar el rango dinámico de 1,5-2,5 dB.

En la **Figura 16**, para la palma aceitera podemos ver que la retrodispersión de esta muestra una mayor variabilidad a lo largo del tiempo.

Para VH en 2015 podemos observar que los valores para los tres polígonos se encuentran sobre -16/-15 dB lo que nos lleva a afirmar que se trata de una zona desnuda o con muy poca vegetación. A partir de ahí, continúa creciendo hasta 2019, donde podemos ver que hay una saturación. A partir de ese punto va disminuyendo los años posteriores.

Para VV podemos ver que también sigue una tendencia ascendente hasta cierto punto de saturación en 2020, sin embargo, los valores de retrodispersión parecen más estables una vez alcanzado este punto. Pero, curiosamente permanece en valores de retrodispersión más altos que en las áreas forestales.

Este comportamiento de los datos VH y VV de la banda C contribuye a enfatizar el potencial de esta configuración de sensor para la discriminación de plantaciones de palma aceitera y de bosque natural.

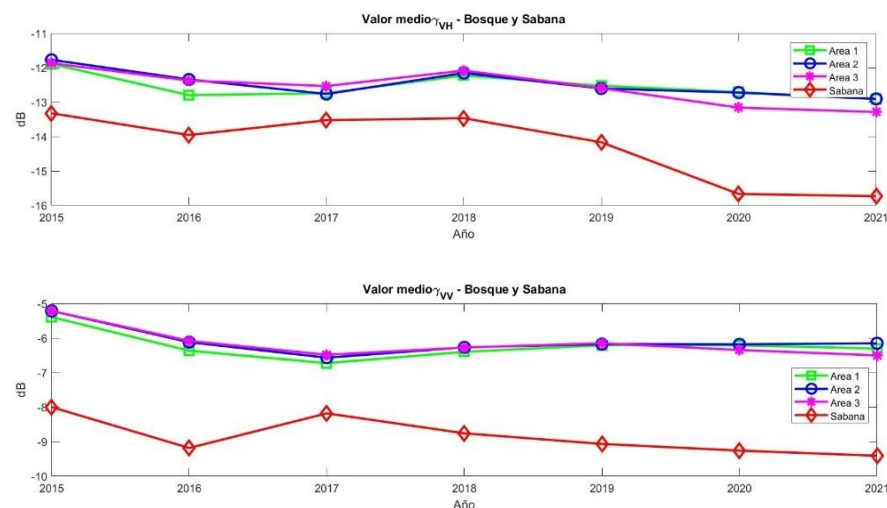


Figura 15 - Series temporales del valor medio de retrodispersión de los canales VH (en la parte superior) y VV (en la parte inferior) para los polígonos de bosque y sabana.

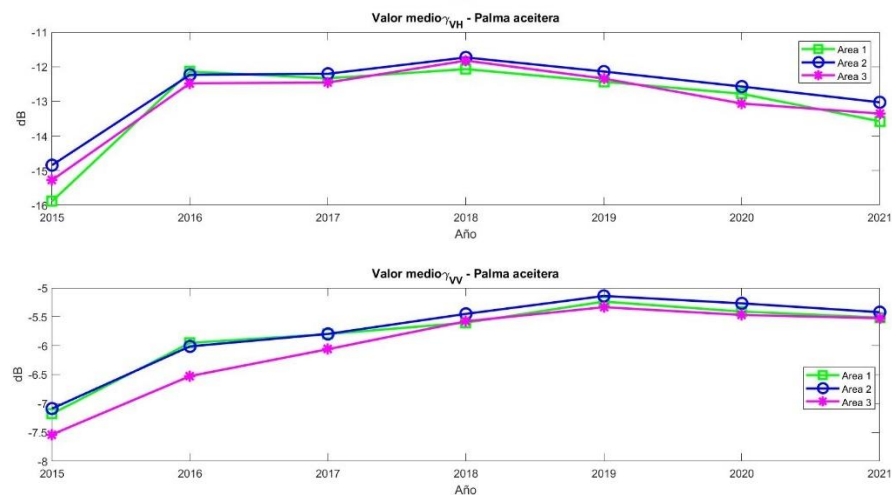


Figura 16 - Series temporales del valor medio de retrodispersión de los canales VH (en la parte superior) y VV (en la parte inferior) para los polígonos de palma aceitera.

En las **Figuras 17 y 18** se representa la desviación típica de estos mismos subsets.

Para los bosques y la sabana la tendencia constante continúa, es decir, los valores de la desviación típica se mantienen similares a lo largo de los seis años.

Para la palma, también se aprecia que hay una mayor variabilidad con el tiempo. Para el canal VH se observa un comportamiento similar al del valor medio (ver **Figura 16**). Es para la banda VV donde se muestra una mayor variabilidad de unos subsets respecto a otros, sin embargo, en 2021 todos ellos se estabilizan.

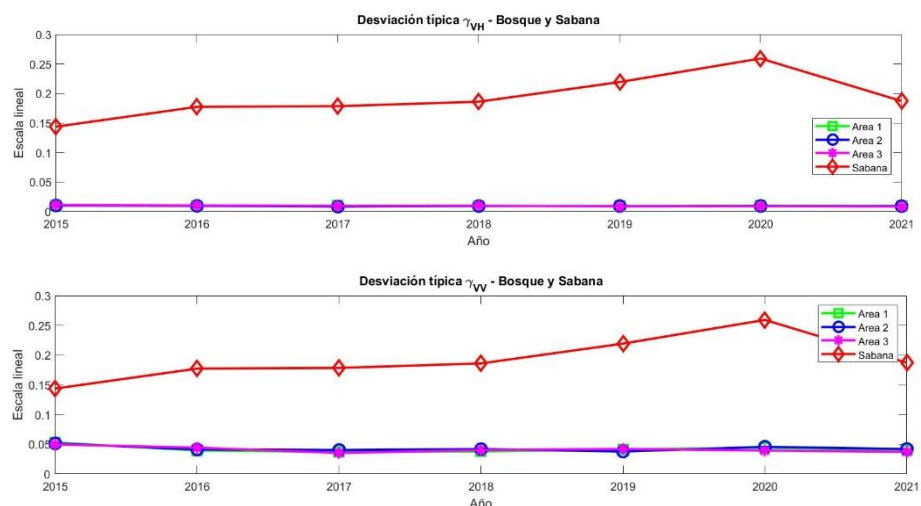


Figura 17 - Series temporales de la desviación típica de los canales VH (en la parte superior) y VV (en la parte inferior) para los polígonos de bosque y sabana.

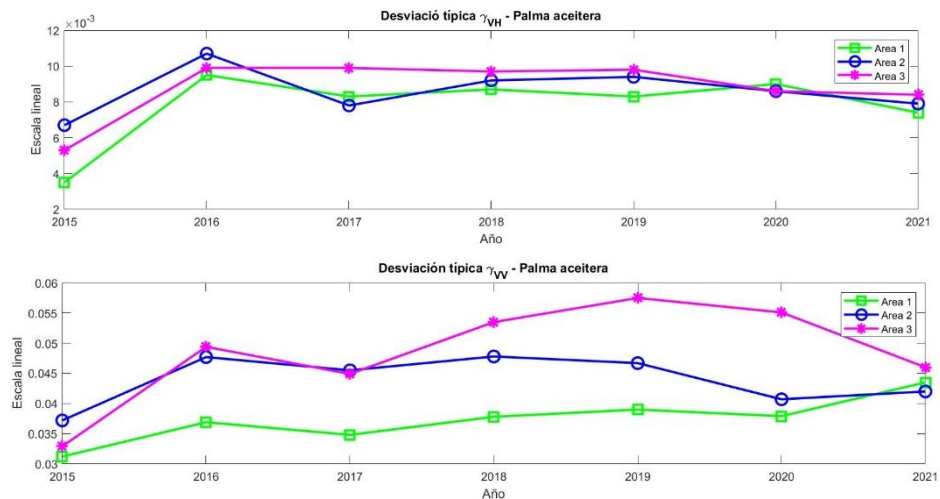


Figura 18 - Series temporales de la desviación típica de los canales VH (en la parte superior) y VV (en la parte inferior) para los polígonos de palma aceitera.

Finalmente, en las **Figuras 19 y 20** se muestran los resultados obtenidos para las series temporales del coeficiente de variación.

En la **Figura 19**, para los bosques, el coeficiente de variación para ambas bandas, VH y VV, se mantiene en un rango estrecho a lo largo del período. La serie temporal de la sabana presenta mayor variabilidad para ambos canales.

En la **Figura 20**, la serie temporal del coeficiente de variación para las áreas de palma en ambos canales sigue siendo el más variable, alcanzando una estabilidad en 2021.

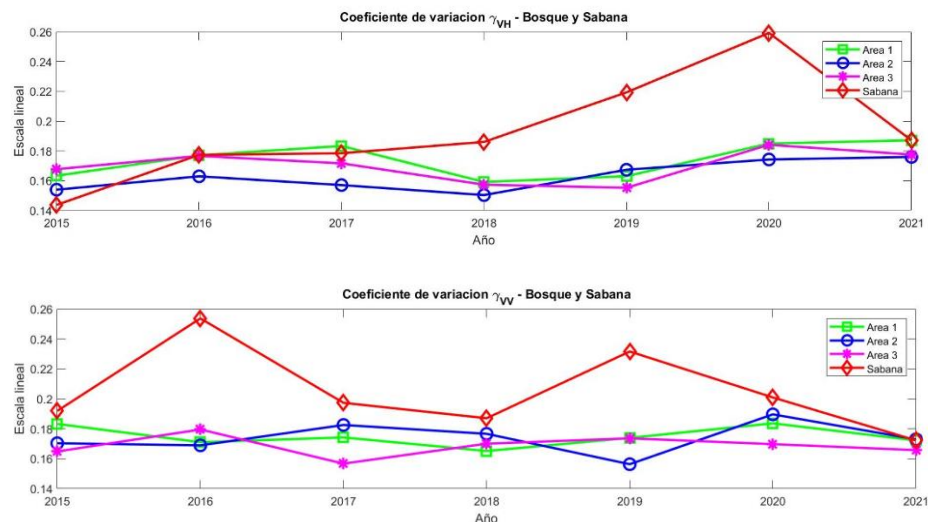


Figura 19 - Series temporales del coeficiente de variación de los canales VH (en la parte superior) y VV (en la parte inferior) para los polígonos de bosque y sabana.

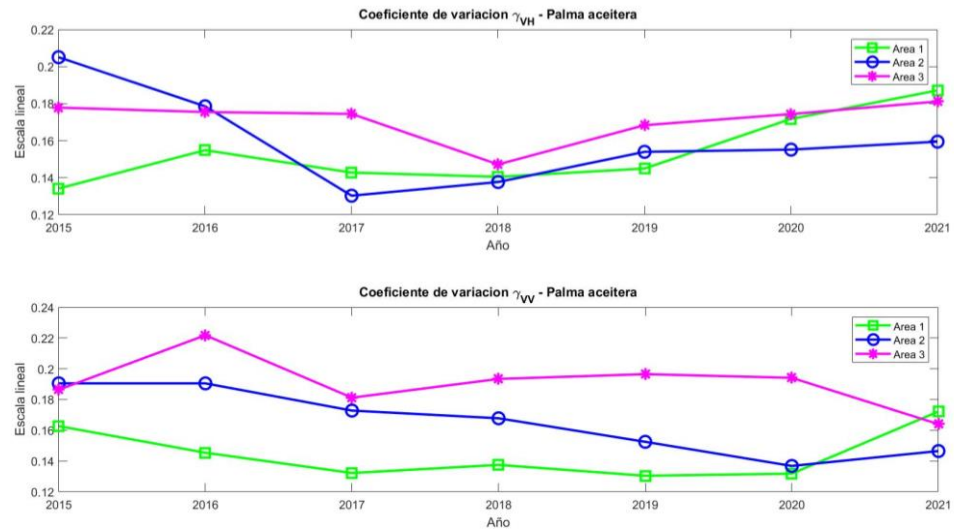


Figura 20 - Series temporales del coeficiente de variación de los canales VH (en la parte superior) y VV (en la parte inferior) para los polígonos de palma aceitera.

4.2.2 Relación VH/VV

Una vez analizadas las series temporales se ha calculado la relación de potencia VV/VH para comprobar cómo se combinan estas diferentes tendencias en una única firma de radar. La **Figura 21** muestra la serie temporal correspondiente a los subsets de bosque y palma aceitera.

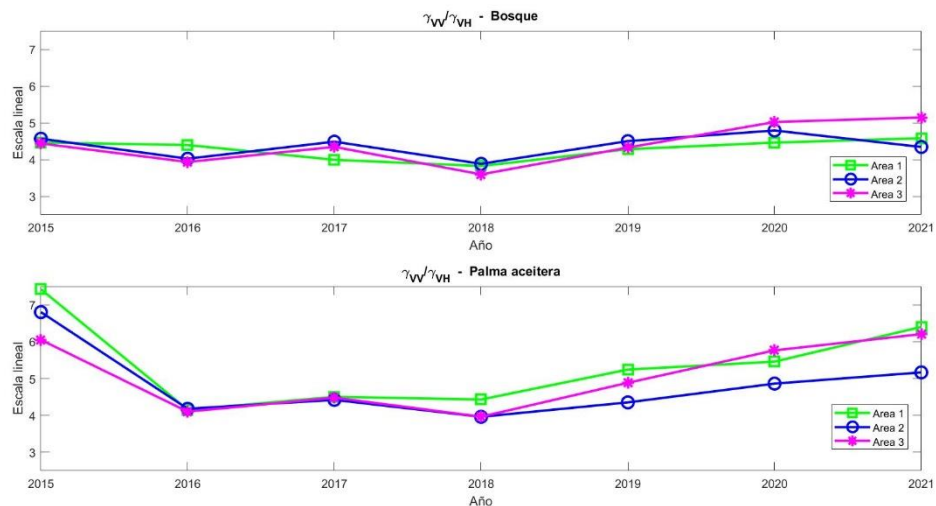


Figura 21 - Serie temporal de la relación VV/VH para bosques tropicales y plantaciones de palma aceitera.

Para las áreas forestales la relación entre VV y VH se mantiene bastante estable entre los valores 4 y 5, tal y como podemos observar en la **Figura 21**. Lo que verifica las conclusiones a las que se había llegado en el apartado **4.1** y **4.2.1**.

Para la palma aceitera en las áreas 1 y 3, es decir, los polígonos P1 y P3, a partir de 2016 la relación entre VV y VH se mantiene relativamente constante hasta 2018 para iniciar una tendencia creciente desde ese año, llegando en 2021 a unos valores entre 6 y 7. Sin embargo, para el polígono P2 se puede ver que crece más lentamente a partir de 2019, lo que nos lleva a manejar la hipótesis que en esta área la plantación está retrasada temporalmente, si bien necesitaremos incluir imágenes posteriores para comprobar este hecho.

Estos resultados parecen constituir una evidencia adicional de la capacidad de las polarizaciones VH y VV de la banda C para discriminar entre bosques tropicales y plantaciones de palma aceitera, como ya se había indicado en este trabajo [19 y 20]. Si bien, enfatizamos de nuevo aquí que la contribución principal de este trabajo se centra en considerar una serie temporal de seis años.

4.3 Clasificador de máxima verosimilitud (ML)

Para ilustrar los resultados y observar la evolución del crecimiento de la palma aceitera desde 2015 a 2021 en la zona de estudio, se ha empleado un clasificador de máxima verosimilitud considerando ambos canales a la vez. Para ello, se han utilizado como vectores de entrenamiento cada uno de los polígonos que se ven en la **Figura 9**. Además, también se ha empleado un polígono adicional para el agua del río.

La leyenda de colores para diferenciar las clases entre sí en todas las imágenes es la siguiente:

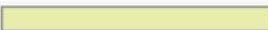


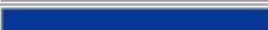

Label	Colour
no data	
bosque	
palma	
savannah_1	
agua	

Tabla 15 - Leyenda de colores para identificar las diferentes clases en las imágenes en las que se ha empleado el clasificador de máxima similitud.

A continuación, se presentan las composiciones ML considerando como vectores de entrenamiento las áreas 1 de bosque y palma, así como la de sabana.

- **2015**

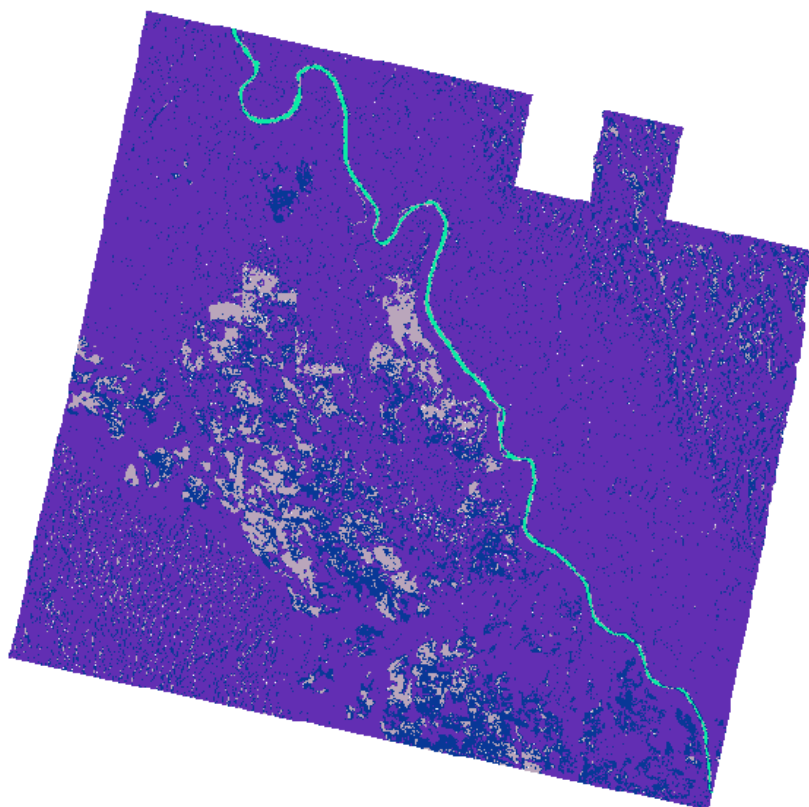


Figura 22 - Imagen de 2015 obtenida empleando el clasificador de máxima verosimilitud para los subsets de bosque 1, palma 1 y sabana.

- **2021**

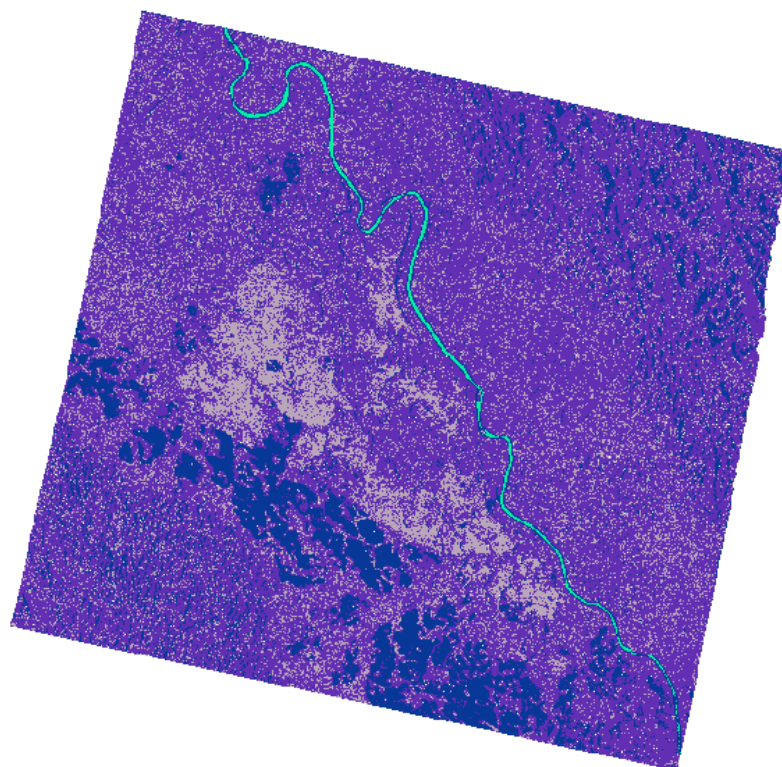


Figura 23 - Imagen de 2021 obtenida empleando el clasificador de máxima verosimilitud para los subsets de bosque 1, palma 1 y sabana.

Las diferencias entre las imágenes de 2015 y 2021 son claramente apreciables.

Para la imagen de 2015 (**Figura 22**) se puede ver que las zonas de bosque, palma y sabana se corresponden con las zonas comentadas en la **Figura 9**.

Además, se aprecia que la plantación de palma aceitera acababa de comenzar por lo que en esas zonas el mecanismo de scattering es similar al de un suelo. Esto hace que no aparezca ambigüedad en términos de respuesta radar entre el bosque tropical y las plantaciones. Las zonas de sabana, como ya explicamos, son minoritarias. Una de estas zonas está aún protegida (arriba a la izquierda de la **Figura 22**) y se pueden identificar correctamente. Otras zonas de sabana, destinadas ahora a las plantaciones también se pueden identificar con la misma clase, posiblemente debido a que las plantaciones ahí aún están poco desarrolladas.

Para la imagen de 2021 (**Figuras 25**), se observa un cambio radical, respecto a las de 2015. Básicamente, lo que se observa es una mayor ambigüedad en la clasificación, apareciendo zonas que casi aleatoriamente aparecen clasificadas como bosque o palma. Esto es debido a que el clasificador ML empleado considera los canales VH y VV separadamente pero no su ratio, el cual vimos que era capaz de discriminar mejor las zonas de bosque y palma cuando ésta había crecido al menos durante seis años.

CAPÍTULO 5

5. Capítulo 5: Conclusiones

5.1 Objetivos cumplidos

En este proyecto se han analizado imágenes satelitales del sensor Sentinel-1, el cual opera en la banda C. En primer lugar, se planteaba el objetivo de estudiar la sensibilidad de la potencia retrodispersada de los canales VH y VV de la banda C. Para ello, hemos analizado las series temporales de retrodispersión para el Sentinel-1 de plantaciones de palma aceitera desde la etapa inicial de crecimiento en 2015 hasta la actualidad, es decir, en un período de seis años. Esto se ha realizado en un entorno tropical en Gabón (África).

Se ha realizado un análisis estadístico de la potencia de los canales VH y VV de varias zonas (bosque, palma y sabana). Se han obtenido el valor medio, la desviación típica y el coeficiente de variación y se ha llevado a cabo un análisis de histogramas. Seguidamente, se han considerado las series temporales de los valores medios de potencia de esos canales teniendo en cuenta la información sobre el terreno aportada en forma de mapas, tanto por una organización medioambiental como por la misma empresa explotadora de las concesiones. El resultado más significativo es que relación entre VV y VH ha demostrado tener potencial para discriminar entre las palmas aceiteras y los bosques naturales.

Además, de manera preliminar, se ha aplicado el clasificador de máxima verosimilitud tomando como entradas los canales VH y VV para estudiar su potencial como clasificador en este escenario. Los primeros resultados indican que, si bien en las etapas iniciales se delimitan bien las zonas de plantación industrial, una vez han pasado seis años existe gran ambigüedad entre la palma y el bosque. Esto nos hace concluir que sería necesario emplear el ratio VV/VH para la clasificación.

Por otro lado, se planteaba el objetivo de comparar los resultados obtenidos en la zona de Gabón con los resultados obtenidos en un estudio anterior en la zona de Indonesia para analizar el potencial de la generalización de los resultados independientemente de la zona geográfica. Para ello, se ha comprobado que los valores estadísticos obtenidos en este estudio son bastantes similares a los que se obtuvieron en el estudio anterior. Aunque se debería esperar al crecimiento total de la palma aceitera (período

de 10 años) para afirmar que se pueden generalizar los resultados independientemente de la zona geográfica.

Según los resultados obtenidos y el análisis realizado en este proyecto, la principal conclusión de este trabajo es que el satélite Sentinel-1 ofrece posibilidades realistas para la monitorización y seguimiento, tanto de la deforestación tropical como de las plantaciones industriales de palma aceitera.

5.2 Líneas futuras de trabajo

Como futuras líneas de trabajo que pueden mejorar los resultados obtenidos en este proyecto se pueden realizar principalmente tres tareas. Una línea de trabajo que resultaría útil explorar sería un modelado electromagnético en la banda C dada la disponibilidad de densas series temporales de imágenes de radar de los satélites Sentinel.

Otra línea interesante, sería realizar el mismo estudio, pero en la temporada seca, es decir, de junio a septiembre. Con ello obtendríamos más resultados del valor medio de la potencia retrodispersada y podríamos analizar cómo influyen las condiciones ambientales a la sensibilidad de los canales VH y VV del satélite Sentinel-1.

Finalmente, sería útil volver a realizar todo el estudio otra vez con el fin de clasificar todos los polígonos de bosque en una única clase y todos los de palma en otra única clase, así como incluir la relación entre VV y VH. Con esto, a la hora de emplear el clasificador de máxima verosimilitud obtendríamos una única imagen para cada año estadísticamente mucho más relevante.

Índice de tablas

Tabla 1 - Características generales del Satélite Sentinel- 1[12].	15
Tabla 2 - Resoluciones para imágenes GRD [7].	16
Tabla 3 - Fecha y nombre de los productos SAR obtenidos del portal ASF DAAC.	21
Tabla 4 - Número de píxeles contenidos en cada polígono considerados en este trabajo.	23
Tabla 5 - Resultado del análisis estadístico para los tres subsets de bosque en 2015.	29
Tabla 6 - Resultado del análisis estadístico para el subset de sabana en 2015.....	29
Tabla 7 - Resultado del análisis estadístico para los tres subsets de palma aceitera en 2015.	29
Tabla 8 - Resultado del análisis estadístico para los tres subsets de bosque en 2021.	29
Tabla 9 - Resultado del análisis estadístico para los tres subsets de sabana en 2021.	30
Tabla 10 - Resultado del análisis estadístico para los tres subsets de palma aceitera en 2021.	30
Tabla 11 - Resultado del análisis estadístico para el subset de bosque en Indonesia [18]	30
Tabla 12 - Resultado del análisis estadístico para el subset de palma aceitera en Indonesia [18].	30
Tabla 13 - Comparación de los resultados del análisis estadístico para los subsets de bosque de Indonesia y Gabón.	31
Tabla 14 - Comparación de los resultados del análisis estadístico para los subsets de palma de Indonesia y Gabón.	31
Tabla 15 - Leyenda de colores para identificar las diferentes clases en las imágenes en las que se ha empleado el clasificador de máxima similitud.	37

Índice de figuras

Figura 1- Concepto del procesado SAR [4].	9
Figura 2 - Propagación de un pulso emitido por el radar [10].	10
Figura 3 - Pulso que recibe el receptor [10].	10
Figura 4 - Geometría de la imagen.	12
Figura 5 - Tipos de reflexión de un pulso radar según la rugosidad de una superficie [10].	14
Figura 6 - Tipos de reflexión de un pulso en una zona de vegetación complejidad morfológica y biofísica del medio [8].	14
Figura 7 - Localización geográfica del área de estudio en Gabón. Con un rectángulo rojo se marca la zona en particular para este proyecto. Imagen obtenida usando Google Earth.	18
Figura 8 - Mapa de referencia del área de estudio [16].	19
Figura 9 - Vista de los polígonos escogidos en la imagen del 14 de abril de 2015 para el canal VV. Las imágenes SAR se han obtenido del portal de datos Alaska Satellite Facility's [17].	20
Figura 10 - Convenciones de normalización de retrodispersión: Beta, Sigma y Gamma	22
Figura 11 - Histogramas de retrodispersión para el año 2015, para bosques B1, plantación de palma aceitera (P1) y sabana (S). En el histograma superior se puede ver el resultado para el canal VH y en el inferior el resultado para el canal VV en dB.	27
Figura 12 - Histogramas de retrodispersión para el año 2021, para bosques B1, plantación de palma aceitera (P1) y sabana (S). En el histograma superior se puede ver el resultado para el canal VH y en el inferior el resultado para el canal VV en dB.	27
Figura 13 - Histogramas de retrodispersión para el año 2015, para bosques B1, plantación de palma aceitera (P1) y sabana (S). En el histograma superior se puede ver el resultado para el canal VH y en el inferior el resultado para el canal VV en escala lineal.	28
Figura 14 - Histogramas de retrodispersión para el año 2021, para bosques B1, plantación de palma aceitera (P1) y sabana (S). En el histograma superior se puede	

ver el resultado para el canal VH y en el inferior el resultado para el canal VV en dB.	28
Figura 15 - Series temporales del valor medio de retrodispersión de los canales VH (en la parte superior) y VV (en la parte inferior) para los polígonos de bosque y sabana.	33
Figura 16 - Series temporales del valor medio de retrodispersión de los canales VH (en la parte superior) y VV (en la parte inferior) para los polígonos de palma aceitera.	34
Figura 17 - Series temporales de la desviación típica de los canales VH (en la parte superior) y VV (en la parte inferior) para los polígonos de bosque y sabana.	34
Figura 18 - Series temporales de la desviación típica de los canales VH (en la parte superior) y VV (en la parte inferior) para los polígonos de palma aceitera.	35
Figura 19 - Series temporales del coeficiente de variación de los canales VH (en la parte superior) y VV (en la parte inferior) para los polígonos de bosque y sabana.	35
Figura 20 - Series temporales del coeficiente de variación de los canales VH (en la parte superior) y VV (en la parte inferior) para los polígonos de palma aceitera. ...	36
Figura 21 - Serie temporal de la relación VV/VH para bosques tropicales y plantaciones de palma aceitera.	36
Figura 22 - Imagen de 2015 obtenida empleando el clasificador de máxima verosimilitud para los subsets de bosque 1, palma 1 y sabana.	38
Figura 23 - Imagen de 2021 obtenida empleando el clasificador de máxima verosimilitud para los subsets de bosque 1, palma 1 y sabana.	38

Bibliografía

- [1] Muyissi Environnement y WRM. (2020, febrero). *Communities facing Zero Deforestation pledges: the case of OLAM in Gabon*. Disponible online: <https://wrm.org.uy/wp-content/uploads/2020/03/Communities-facing-Zero-Deforestation-pledges-case-Olam-Gabon.pdf>
- [2] L. (s. f.). *WRM in English / World Rainforest Movement*. WRM. Disponible online: <https://wrm.org.uy/> (consultada en junio de 2021).
- [3] Mighty. (2016, diciembre). *PALM OIL 'S BLACK BOX How agribusiness giant Olam's emergence as a major palm oil trader is putting forests in Southeast Asia and Gabon at risk*. https://www.mightyearth.org/wp-content/uploads/2016/07/Olam-technical-report_Dec-9_with-images_lowres1-002.pdf
- [4] Wang, W.-Q. (2017). *Multi-Antenna Synthetic Aperture Radar*. CRC PRESS.
- [5] *ERS Radar Courses - ESA Operational EO Missions - Earth Online - ESA*. (s. f.). ESR RADAR COURSES. Disponible online: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/ers/instruments/sar/applications/radar-courses> (consultada en junio de 2021)
- [6] *Tutorial: Radar Polarimetry*. (s. f.). Government of Canada. Disponible online: <https://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-and-air-photos/satellite-imagery-and-products/educational-resources/tutorial-radar-polarimetry/9579> (consultada en junio de 2021).
- [7] *Level-1 Products - Sentinel-1 SAR Technical Guide - Sentinel Online - Sentinel*. (s. f.). THE EUROPEAN SPACE AGENCY. Disponible online: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/products-algorithms/level-1-algorithms/products> (consultada en junio de 2021).

- [8] J.A.S.W. (2019). *The Sar Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation*. SERVIR Global Science Coordination Office.
- [9] *Radar Polarimetry*. (s. f.). Government of Canada. Disponible online:
<https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/satellite-imagery-air-photos/remote-sensing-tutorials/microwave-remote-sensing/radar-polarimetry/9275> (consultada en junio de 2021).
- [10] Fundamentos de teledetección radar. (2018). *Fundamentos de teledetección radar*, 12–15. Disponible online:
https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/actividades/OBS/Programa_Marco_Copernicus_User_Uptake/5_Fundamentos_de_teledeteccion_radar.pdf.
- [11] *Sentinel-1 - Missions - Sentinel Online - Sentinel*. (s. f.). THE EUROPEAN SPACE AGENCY. Disponible online:
<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1> (consultada en junio de 2021).
- [12] Podest, E. *Conceptos Básicos del Radar de Apertura Sintética* [Diapositivas]. ARSET SLIDES. Disponible online:
<https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/Session1-SAR-Spanish.pdf>
- [13] *SNAP – STEP*. (s. f.). Science Toolbox Exploitation Platform. Disponible online: <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/> (consultado de enero a junio de 2021)
- [14] Woittiez, L. S.; van Wijk, M. T.; Slingerland, M.; van Noordwijk, M.; Giller, K. E. *Yield gaps in oil palm: A quantitative review of contributing factors*. European Journal of Agronomy. Elsevier B.V. 2017, 83, 57–77.

- [15] Small, D., Miranda, N., & Meier, E. (2009). A revised radiometric normalisation standard for SAR. *2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Disponible online:
<https://doi.org/10.1109/igarss.2009.5417439>
- [16] *Plantations agroindustrielles au Gabon: vers un triple impact positif*. (2017, octubre). [Diapositivas]. Disponible online:
https://theforestdialogue.org/sites/default/files/tfd_udf_gabon_olampalm_presentation_2017.pdf
- [17] *ASF Data Search*. (s. f.). ASF Data Search Vertex. Disponible online:
<https://search.asf.alaska.edu/#/> (consultada en junio de 2021).
- [18] Santoro, M.; Beer, C.; Cartus, O.; Schmullius, C.; Shvidenko, A.; McCallum, I.; Wegmüller, U.; Wiesmann. (2011). *Retrieval of growing stock volume in boreal forest using hyper-temporal series of Envisat ASAR ScanSAR backscatter measurements* (Vol. 115). Editorial Board.
- [19] Dong, X.; Quegan, S.; Yumiko, U.; Hu, C.; Zeng, T. *Feasibility Study of C- and L-band SAR Time Series Data in Tracking*.
- [20] *Indonesian Plantation and Natural Forest Cover Changes*. IEEE. J.Sel.Top.Appl. Earth Obs. Remote Sens. 2015, 8, 3692-3699.